农田土壤理化参数快速获取技术研究进展与展望

齐江涛[1,2], 程盼婷[1,2], 高芳芳[1,2], 郭　丽[1,2], 张瑞瑞[3*]

(1. 吉林大学工程仿生教育部重点实验室,吉林长春 130022,中国; 2. 吉林大学 生物与农业工程学院,吉林长春 130022,中国; 3. 北京市农林科学院智能装备技术研究中心,北京 100097,中国)

摘　要：［**目的/意义**］土壤是农业基本的生产资料，其质量与农业高效生产和可持续发展密切相关。由于以往对农田的高强度利用以及土壤侵蚀等原因，导致部分农田出现土壤有机质明显下降、地力减弱和生态功能退化等现象。土壤理化参数作为揭示土壤空间特征、评估土壤肥力的关键指标，对农田可持续利用起着至关重要的作用。因此，土壤理化参数信息的快速获取极为必要。［**进展**］探讨了农田土壤理化参数获取技术的研究意义，总结了当前用于农田土壤理化参数信息获取的主要技术，包括以电化学分析和光谱分析为主的实验室快速检验技术，以电磁感应、探地雷达、多光谱、高光谱和热红外为主的近地快速感知技术，以直接反演法、间接反演法和结合分析法为主的卫星遥感技术，以及近年的新型快速获取技术，如生物传感、环境磁学、太赫兹光谱和伽马能谱等，梳理了各方法的优缺点及适用情况。［**结论/展望**］结合农田环境的作业需求，依据未来研究的侧重方向提出发展建议，包括开发便携化、智能化和经济型的近地土壤信息获取系统及设备，实现土壤信息的原位快速检测。优化低空土壤信息获取平台的性能，完善数据的解译方法；联合多因素构建卫星遥感反演模型，利用多种共享开放的云计算平台实现数据的深度挖掘。深入探索多源数据融合在土壤理化参数信息获取中的研究与应用，构建泛化能力强、可靠性高的土壤信息感知算法和模型等，从而实现土壤理化参数信息快速、精准和智能化获取。

关键词：土壤理化参数；光谱分析；电磁感应；探地雷达；卫星遥感；快速感知

中图分类号：S24；S-1　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**SA202404003

引用格式：齐江涛, 程盼婷, 高芳芳, 郭丽, 张瑞瑞. 农田土壤理化参数快速获取技术研究进展与展望[J]. 智慧农业(中英文), 2024, 6(3): 17-33. DOI：10.12133/j.smartag.SA202404003

QI Jiangtao, CHENG Panting, GAO Fangfang, GUO Li, ZHANG Ruirui. Research Advances and Prospects on Rapid Acquisition Technology of Farmland Soil Physical and Chemical Parameters[J]. Smart Agriculture, 2024, 6(3): 17-33. DOI：10.12133/j.smartag.SA202404003 (in Chinese with English abstract)

0　引　言

农田土壤是农业生产的基础和关键要素，其质量影响着国家的粮食安全和农产品供应。耕地是粮食生产的载体，近年来中国一直坚持严格落实耕地保护制度，强调耕地数量、质量和生态保护的重要性。优质的土壤不仅能够为农作物提供充足的养分和水分，保障其生长发育以及农产品的产量和质量，还能推动农业可持续发展、推进生态文明建设和提高社会经济效益。然而，传统农业中过度耕作和机械化作业导致土壤结构硬化板结、土壤肥力流失；不合理的施肥施药等使得土壤养分失衡、微生物活性降低；城市化和工业化的发展也导致部分农田土壤受到污染。上述现象对农业可持续性发展、粮食的产量和食品安全等都造成了严重威胁。

理化参数作为土壤的基本属性特征，可以反映土壤的肥力、质地结构和污染程度等质量信息[1]。及时获取土壤的理化参数信息有助于土地的合理施肥、监测评估和修复保护，进一步加快农业农村现代化发展和推进智慧农业建设。农田土壤理化参数主要包括土壤质地、含水率、盐碱度、重金属、pH和有机质等[2]。传统实验室化学分析法属于土壤理化参数信息获取技术中精度较高且应用广泛的

收稿日期：2024-03-31

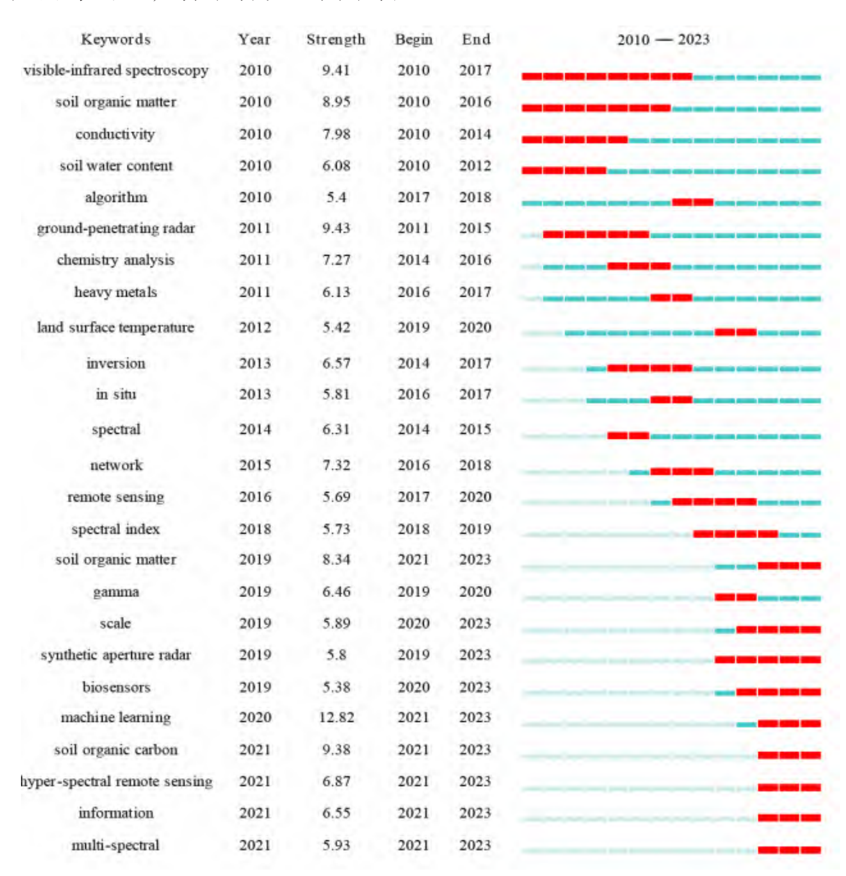
基金项目：国家重点研发计划课题（2021YFD2000201）；吉林省中青年科技创新创业卓越人才团队（20230508032RC）

作者简介：齐江涛，研究方向为精准农业与仿生感知技术。E-mail：qijiangtao@jlu.edu.cn

*通信作者：张瑞瑞，博士，研究员，研究方向为农业智能化技术、信息化技术。E-mail：zhangrr@nercita.org.cn

一种技术，比如检测有机质的重铬酸钾容重法[3]、检测硝态氮的分光光度法[4]、检测全氮的半微量开氏法[5]、检测全磷的钼锑抗比色法[6]、检测全钾的火焰光度计法[7]以及检测pH的电位法[8]等。传统实验室化学分析法的适用性良好，其较高的灵敏度和准确性为土壤参数的定性定量分析提供了可靠的依据。但该方法流程多，前期准备工作复杂且需要在实验室内进行，分析时间较长，因此在土壤理化参数快速实时获取方面有很大的局限性。

为解决传统实验室化学分析法存在的流程多、耗时长和不能实时检测等问题，各学者从不同学科发展的角度对土壤监测展开了深入研究，取得了重大突破。本研究基于Web of Science平台的检索功能查找以“土壤”为主题的相关文献，并添加“电化学”“光谱”“电磁”“探地雷达”“卫星”等关键词进行检索，选定时间范围是2010～2023年。为排除干扰，手动删除无效、重复文献。随后将所得相关文献进行汇总、转换并输入到CiteSpace可视化软件中，以文献关键词作为节点类型，绘制了有关土壤理化参数检测技术研究的关键词突现图如图1所示。



注：“Year”表示关键词首次出现的时间；“Strength”表示突现词的突现强度；“Begin”表示突现开始的时间；“End”表示突现停止的时间；右侧红条长度表明突现累积的时间。

图1 土壤理化参数研究关键词突现图

Fig.1 Keywords highlighting map for the study of soil physical and chemical parameters

通过对关键词突现图进行分析，不仅可以了解农田土壤理化参数获取技术领域的研究热点，还能够根据当前的研究现状和不足进一步预测该领域未来的研究趋势。对上述关键词进行分析可知，从2010年到2023年，关键词逐渐由“电化学分析”“近红外光谱”等过渡到“机器学习”“遥感”“多光谱”，以及“光谱指数”等，表明当前的土壤理化参数获取技术逐渐由传统的室内化学分析和室内光谱仪分析转变为室外的近地实时检测，尤其是搭载在无人机及卫星上的土壤传感器技术受到广泛关注。此外，近年来还出现了一些新的监测技术，如生物传感、太赫兹光谱等。但由于农田环境的复杂多样、农业传感器的性能和数据处理技术有待改善，当前的土壤理化参数获取技术仍有很大的改进空间，可以推测，在未来一段时间内，近地探测、无人机感知以及卫星遥感等技术依旧是该领域的研

究热点。

在保障国家粮食安全、发展智慧农业与精准农业的战略背景下，农业现代化的进程不断推进，对土壤质量的精细管理需求日益增加。因此，实现农田土壤理化信息的快速获取极为必要。为把握该领域的研究现状和未来发展方向，本研究依据数据获取方式的不同，将农田土壤理化参数获取技术归为实验室快速检验技术、近地快速感知技术、卫星遥感技术以及新型快速获取技术（如图2），对各类技术的原理、适用范围、优势及局限性进行分析和总结，并依据该领域的研究热点、应用瓶颈和未来发展趋势提出建议。

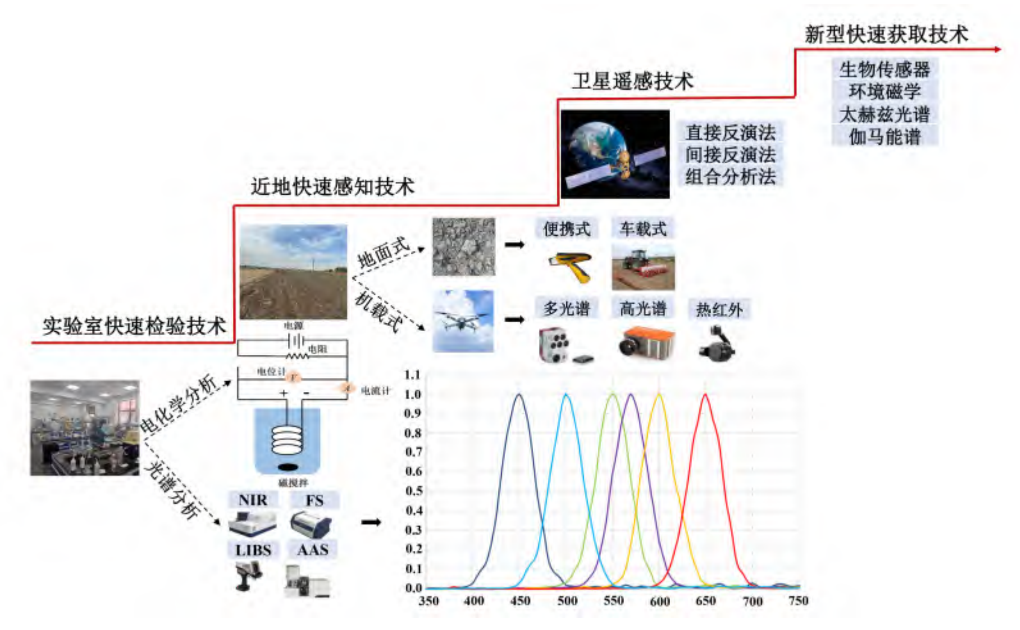


图2 农田土壤理化参数快速获取技术体系

Fig. 2 The rapid acquisition technology system of soil physical and chemical parameters in farmland

1 实验室快速检验技术

实验室快速检验技术是常用的土壤监测方法，不仅节省时间和资源，还具有较高的准确性。一般使用随机采样、网格采样和基准采样等方法采集能够代表样本总体特征的土壤样品，并将其送至实验室进行分析。常用于土壤理化参数信息获取的实验室检验技术有电化学分析和光谱分析。

1.1 电化学分析

电化学分析是在传统实验室化学分析法的基础上，通过在电极表面引发化学反应，测量与反应相关的电流、电势或电荷的变化进而实现检测目标的含量和性质分析[9]。相比于传统实验室化学分析法，电化学分析具有操作简单、分析时间相对较短和灵敏度高等优势[10]，常见的有伏安法和电极法（见表1）。

表1 土壤检测中常见的电化学分析方法

Table 1 Common electrochemical analysis methods in soil detection

电化学分析方法	工作原理	主要应用	优点	局限
伏安法（Voltammetry）	基于测量电流与电势之间的关系，通过改变电势来观察电流的变化，从而得到样品中化学物质的信息[11]	土壤重金属	抗干扰能力强、灵敏度高、可靠性强	仅限于可溶性物质的测定，对电极的制备、电解液的选择和控制等要求较高
电极法（Electrode method）	利用电极与离子反应产生的电势差来测量离子的活度或浓度[12]	土壤氮、磷、钾	操作简单、精度高、实时监测	前期处理工艺复杂，电极表面的污染、氧化等因素也会影响测量结果，需要及时对电极表面进行处理和校正

常用于获取土壤理化参数的溶出伏安方法有方波脉冲阳极溶出伏安法（Square-Wave Anodic Stripping Voltammetry, SWASV）和差分脉冲阳极溶出伏安法（Differential Pulse Anodic Stripping Voltamme-

try, DPASV)。Zhao等[13]提出了一种新型的电化学测量系统，利用两种不同的原位镀铋膜电极，采用改进的溶出伏安法对土壤中痕量Cd和Pb进行灵敏测定，并且还将SWASV与支持向量机（Support Vector Machine, SVM）耦合进而构建了土壤Pb^{2+}浓度检测模型[14]。此外，电极法也极适用于土壤理化参数的测定和感知，Anubhuti等[15]基于离子选择性电极法开发了一种用于估算土壤养分和肥料的智能便携式设备，该设备所测得的铵态氮、钙、钾等养分含量与标准法测得的养分含量之间的相关系数达到0.97以上，在土壤养分的实时监测领域具有巨大的应用潜力。

基于电化学分析的土壤理化参数获取技术历经多年发展取得一定成果，但在使用该技术时流程较多，需要对土壤样品进行一系列的预处理，并且只能检测部分土壤理化参数。后续研究可通过改进电极材料、优化测量方法等进一步提高监测精度；开发便携式、无线传输的电化学传感器，实现对土壤理化参数的实时监测和远程数据传输；结合多种电化学分析方法，实现对土壤中多个理化参数的联合分析，提供更全面的土壤信息。

1.2 光谱分析

光谱分析利用样品与光的相互作用来获取待测样品的浓度或结构信息，具有灵敏度高、抗干扰能力强且检测限低等优势[16]，是应用最为广泛的感知技术之一。目前，应用于农田土壤理化参数信息获取的光谱分析技术主要包括以下几种（见表2）。

表2 土壤检测中常见的光谱分析方法

Table 2 Common used methods of spectral analysis in soil detection

光谱分析方法	工作原理	主要应用	优点	局限
近红外光谱(Visible-Infrared Spectroscopy, NIR)	当近红外光照射到样品上时，样品中的分子会吸收特定波长的光，通过测量样品在不同波长下的吸收强度，获取样品中化学键和分子的振动或转动信息，从而获得样品的理化信息[17]	应用广泛，包括土壤有机质、重金属、氮磷钾、有机碳、pH、质地、含水率等	多组分分析、非破坏性、分析速度快、适应性强和无需特殊样本制备等	波峰易重叠、数据处理复杂、仪器设备维护需要专业人士进行操作、需通过较复杂的模型来提高检测精度
激光诱导击穿光谱(Laser-Induced Breakdown Spectroscopy, LIBS)	利用激光脉冲的高能量密度使样品表面产生等离子体，形成高温高压的微观区域，在等离子体形成和衰减的过程中，样品中的原子和离子会发生电子激发、跃迁和辐射，产生特征光谱信号。通过分析该光谱信号，可以确定样品中的元素组成和浓度[18]	土壤重金属	制样简单、实时检测、非接触性、无需样品预处理、灵敏度高	设备昂贵、分析深度有限、土壤产生的基体效应和光谱干扰会对测定结果产生影响、检测仪器昂贵、数据处理复杂
荧光光谱(Fluorescence Spectroscopy, FS)	通过激发样品中的分子或原子，使其产生荧光发射，然后通过分光仪检测荧光发射的波长和强度，从而分析样品的成分和性质[19]	土壤重金属、微量元素	灵敏度高、非破坏性、响应快、实时监测	荧光强度易受干扰、设备昂贵
原子吸收光谱(Atomic Absorption Spectroscopy, AAS)	通过将待测样品中的金属元素转化为气态原子，并使用特定波长的光源进行光吸收测量，吸收光强度与待测金属元素的浓度成正比。通过测量光源发射光束进入和离开样品后的光强度差异，可以确定待测金属元素的浓度[20]	微量金属元素	选择性和灵敏度高	需要较复杂的光学系统，样品预处理和仪器校准复杂，并需要一定的实验操作和专业知识，单元素分析

基于光谱分析的土壤理化参数获取技术满足了灵敏度高、非破坏性等检测需求，但光谱数据的处理和分析过程比较复杂[21]。为提取有效的光谱特征和建立稳定的分析模型，深度学习成为众多学者在土壤领域的研究热点[22]。比如，Xu等[23]将卷积神经网络（Convolutional Neural Network, CNN）应用到非预处理的LIBS预测土壤类型和土壤属性中，发现各土壤参数的均方根误差明显减小，尤其是土壤有机质（Soil Organic Matter, SOM）、全氮（Total Nitrogen, TN）和全磷（Total Phosphorus, TP）参数的均方根误差较传统的偏最小二乘回归法（Partial Least Squares Regression, PLSR）分别降低了4.97%、9.56%和10.05%，表明CNN可以很好地降低过拟合。

尽管深度学习在土壤特性监测中有较好的应用前景，但由于农田土壤成分复杂、存在较大的空间变异性，大部分光谱分析技术仍需样品制备、数据预处理等一系列前操作，不能满足土壤信息实时获取的需求。随着微电子技术及大数据的快速发展，基于光谱技术的土壤检测设备不断向智能化、便携化和精准化方向发展。Soriano-Disla等[24]测试和比较了四种便携式、小型化的中红外和可见光-近红外光谱仪的性能，发现中红外手持式仪器在土壤属性的监测中表现最好。De Lima等[25]和Rawal等[26]的实验均使用了便携式X射线荧光光谱仪，实现了对草原农业区土壤样品中有机质、Ca、Mn、Cu等元素含量的预测，以及农业土壤盐基饱和度的测定。便携式光谱仪的出现使得光谱分析技术实现了由室内检测到田间快速检测的跨越，为精准农业和智慧农业的发展提供了技术支撑。

2　近地快速感知技术

随着科学技术的不断进步，传感器在农业领域的应用越来越广泛，尤其是近地监测方面的传感器种类和功能不断增多[27]，极大地促进了农田土壤理化参数快速获取技术的发展。相比于实验室快速检验技术，近地快速感知技术不仅具有高精度和实时检测能力，还实现了自动化和多参数检测。常用于农田土壤理化参数信息近地快速获取的传感器有以下几种（见表3），它们都各具优势和局限性。

表3　常见的土壤检测传感器

Table 3 Common soil detection sensors

传感器	主要应用	优点	局限
电磁感应传感器（Electromagnetic Induction Sensor）	土壤电导率、含水率、含盐率、质地等	快速高效、非破坏性、频率范围广泛	易受外界电磁干扰、成本较高
探地雷达（Ground Penetrating Radar，GPR）	土壤含水率	非侵入性、实时性、快速精准	探测深度有限、数据解释复杂、设备昂贵
多光谱（Multispectral）	土壤含水率、含盐率	可获取较大范围的遥感数据，数据量较小，处理和分析相对简单	光谱信息较少，空间分辨率相对较低，无法提供较精细的地物定位和描述
高光谱（Hyperspectral）	土壤有机质、土壤含水率、含盐率等	提供大量的连续光谱信息、空间分辨率较高	数据量大、数据处理复杂、成本较高
热红外（Infrared thermal）	土壤含水率、重金属	对温度和热量的变化较为敏感，不受天气或光照影响	空间分辨率较低、价格高昂

2.1　电磁感应传感器

电磁感应传感器属于典型的土壤近地式传感器。早期的电磁感应传感器被用来监测土壤强度[28]，之后随着电磁理论应用范围的不断拓展，该类型传感器在土壤监测领域的应用潜力被挖掘，逐渐应用于土壤电导率、含水率、含盐率，以及土壤质地等信息的快速获取。

大地电导率仪是基于电磁感应原理设计的非接触、无破坏性的土壤属性测定仪器（如图3）。Ratshiedana等[29]评估了EM38-MK仪器在测定土壤表观电导率方面的适用性，结果发现土壤含水量是允许电流在土壤介质中流动的主要驱动因素。为探究棉田土壤剖面不同土层实测电导率与表观电导率之间的关系，冯春晖等[30]基于电磁感应技术和多元线性回归方法构建了两者之间的反演模型，发现其相关系数在0.82～0.99之间，同时采用三维反距离权重插值法（Three Dimensions-Inverse Distance Weight, 3D-IDW）实现了土壤盐分的三维可视化。不同深度土壤的质地和保水能力存在很大的差异，Shaukat等[31]使用移动非侵入式电磁感应传感器绘制了西澳大利亚州农场的土壤表观电导率，并根据电阻率层析成像与体积含水量之间的校准关系预测了整个田间3个不同深度的土壤水分水平，实现了土壤水分空间信息的快速检测。Mensah等[32]通过多线圈和多频率传感器比较了不同土地利用条件下的表观电导率测量值，研究了表观电导率、质地、有机质和容重等土壤理化参数在不同土地利用条件下的空间变化。

电磁感应传感器的结构简单、可靠性高、寿命长，不仅能够对微小的磁场变化做出快速响应，还能实现土壤理化参数的非接触式检测，避免了农田污染等问题。此外，电磁感应传感器与多光谱[33]、高光谱[34]和热红外[35]技术相结合能够实现对土壤盐分、水分的更高精度监测。然而，该传感器在土壤信息获取方面仍存在一些不足之处：从传感器本

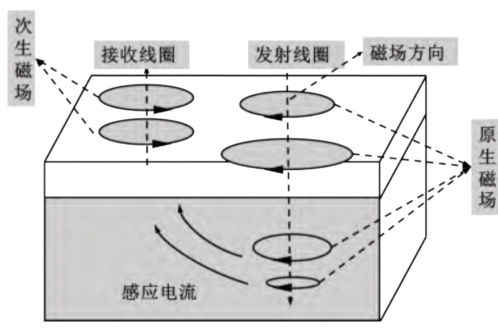


图3 EM38-MK仪器示意图

Fig. 3 EM38-MK instrument schematic diagram

身来看，该传感器对外界电磁场的干扰比较敏感，可能会受到其他电磁设备或电源的影响[36]，导致测量结果不准确，并且只能在一定距离内进行有效检测，超出范围后信号便会快速衰减；从农田作业需求来看，不同作物生长时期的土壤监测建模参数并不一致，当前研究较多的单一特定时期的建模效果并不适于全时期的土壤信息监测。在未来，仍需继续探索多线圈、多频率传感器的相互作用，以降低电磁感应传感器在工作时所受的干扰。此外，通过融合多个单一时期的建模效果实现全时期高精度的土壤信息动态监测，也是未来研究的重点方向。

2.2 探地雷达

GPR利用发送的高频电磁脉冲波来揭示地下目标物的布局和特征[37]。电磁波由天线发射并向地下传送，在传播过程中因接触到不同的介质而发生反射，这些反射波在抵达地面时会被接收天线所侦测到（如图4）。通过分析反射信号的时频特征和振幅特征，能够对地下目标物进行准确定位，并分析其结构、电性，以及几何形态等特征。

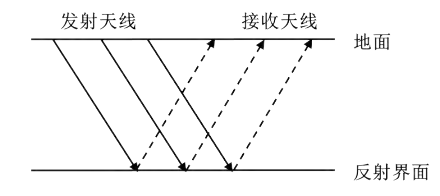


图4 探地雷达探测方式

Fig. 4 Profile method for ground penetrating radar detection

GPR作为一种快速、精准、无损的土壤含水率原位检测技术，受到了广大学者的关注。谢国青和陈紫秋[38]基于功率谱密度分析法和主成分分析法探究了GPR功率谱与土壤含水率之间的关系，发现雷达功率谱特征与土壤含水率变化具有较高的相关性，该实验为GPR监测土壤含水率提供了技术支撑。尽管GPR能够实现定量深度的土壤含水量监测，但不同土壤类型、不同耕作方式都会对反演模型产生影响。Liu等[39]使用GPR分别估测了免耕和深耕模式下的农田土壤含水率及其空间分布，证明了基于GPR信号的平均包络幅值法在估计农田浅层土壤含水率方面是可行的。Song等[40]提出了一种利用地面穿透雷达测量土壤水分的像素级方法，能够以更高的分辨率和更小的误差再现土壤水分的空间分布。此外，深度学习作为一种智能手段被一些学者应用到GPR反演土壤含水率中，比如Pongrac等[41]设计了一种高压脉冲雷达，将深度回归卷积网络扩展到三维，用于建模发射和接收信号之间波传播的变化，最后通过跨孔法对体积土壤含水率进行估计。Li等[42]使用CNN网络来反映GPR数据与体积土壤含水量之间的关系，并提出了一种基于GPR的土壤含水率预测网络框架GPRSW（Ground Penetrating Radar Soil Water），结果表明，该框架的土壤含水量反演可在近10 s内完成，精度相对稳定，最大误差小于0.03 cm^3/cm^3。

GPR可以在不破坏地表的情况下对含水率、质地、结构等土壤特性进行快速分析[43]，减小了对土层的破坏，降低了对环境的污染。但其探测深度受到多种因素的限制，如电磁波的频率、地下介质的性质以及电磁波能量的耗损等，无法深入探测较深的地下目标。此外，GPR设备价格较高，获取的数据需要经过专业人员进行解释和分析，对操作者的技术要求较高。在监测农田土壤状况的实际应用中，要综合考虑各种复杂的地质环境对探测精度的影响，如秸秆覆盖、地下水、金属物体等会对信号造成干扰，导致数据的准确性下降。如何采用更高频率的电磁波、更先进的信号处理算法和更灵敏的接收器来实现更高的空间分辨率仍是未来研究重点。另外，目前的GPR主要提供二维的地下图像，仍存在信息不全面的缺陷。通过融合多种传感器和改进数据处理算法，获取更多维度、更加全面的土壤信息，将更有助于精准农业的发展。

2.3 多光谱

多光谱是一种能够在可见光、红外光和紫外光等范围内获取多个光学频谱波段（通常包括几十个波段）的光谱探测技术，每个波段的宽度一般为10～20 nm。多光谱技术为土壤水分、盐分、有机质、氮磷钾、重金属等含量的精准检测提供了新的思路[44]，有助于实现无损实时在线检测和精准农

业。Helfer等[45]基于多光谱传感器和机器学习研制了一种便携式的设备，能够实现黏土浓度的预测。土壤盐渍化是与经济发展息息相关的全球性问题[46]，既阻碍了作物根系吸收营养，又破坏了土壤理化性质，因此，部分学者基于多光谱传感器展开了对土壤盐渍化程度的监测。比如，张同瑞等[47]使用ADC便携式多光谱相机和EC110便携式盐度计收集了近地面多光谱图像和表层土壤盐度数据，并依据植被指数建立了二者之间的关系模型，所得最佳土壤含盐量预测模型的准确率高达93.36%。

尽管便携式多光谱仪器弥补了传统检测方法的费时费力、室内监测等不足，但仍存在检测范围有限的问题。而随着多旋翼无人机技术的突飞猛进，尤其是无人机平台的稳定性不断提升、操作难度逐渐下降[48]，利用多光谱传感器获取土壤理化信息的研究热点逐渐转移到无人机平台上。使用无人机飞行平台进行土壤监测需要的时间取决于多种因素，如监测区域的大小、采集数据的分辨率、无人机的飞行速度等，一般为几个小时。Wei等[49]利用无人机多光谱影像定量估算土壤含盐量，构建了多个光谱协变量用于数据的深度挖掘，反演模型精度达到了0.83以上，表明无人机多光谱传感器是一种可行的土壤含盐量估算工具。随着机器学习的深入应用，基于无人机搭载的多光谱传感器在评估土壤含水率方面也发挥着越来越重要的作用。王银凤[50]基于无人机多光谱遥感影像探究了光谱反射率、光谱指数等信息与土壤含水率的相关性，比较了SVM、PLSR、反向传播神经网络（Back Propagation Neural Network, BPNN）以及随机森林（Random Forest, RF）四种机器学习算法反演土壤含水率的效果，结果发现利用变量重要性投影法（Variable Importance Projection, VIP）结合SVM构建的反演模型精度最高，R^2约为0.80。然而，在提取多个光谱变量特征时往往会存在信息冗余和重叠的问题。为减小这一问题对反演结果产生的影响，张成才等[51]在土壤含水率反演过程中引入了特征变量筛选方法，使得建模效率得到明显提升。

多光谱传感器能够捕获不同波长的光，获得精细且通量大的光谱信息。相比于取样检验式技术以及便携设备，以无人机为飞行平台的土壤理化参数获取技术能够满足大尺度高精度监测、实时监控、远程操作以及长期连续的数据收集等需求，在复杂农田环境的监测应用中存在时效性高、灵活性强、方便快捷等明显优势[52]。但大量的光谱数据处理起来相对复杂，对光照条件的要求也较高。因此，在应用多光谱传感器进行土壤理化信息获取时，不仅要尽量保证光照条件的稳定性和一致性，还要考虑植被光谱与土壤光谱之间的相互影响。另外，还需加强对多光谱数据的挖掘，或是结合雷达、近红外等技术进行多源数据同化[53]，利用强大的计算能力和高级算法进行数据处理，进一步提高土壤信息的反演精度。

2.4 高光谱

高光谱是指波长范围宽广，包含连续、高分辨率光谱信息的一种技术，一般包含几百个波段，每个波段的宽度比较窄，为1～10 nm。从定义上来看，其与多光谱的主要区别是，多光谱是在数个离散较宽的频段进行数据收集，而高光谱则是在近似连续的一段频域内进行收集。因此，相比于多光谱技术，高光谱可以提供更详细的光谱数据，迅速捕捉到土壤信息的细微变化，在精准分析和识别土壤成分、提取特征波段等方面具有更大优势[54]。随着无人机飞行平台和计算机技术的不断更新与发展，高光谱传感器成为快速感知多种土壤理化参数信息的研究热点。

夏晨真等[55]以东北黑土区玉米试验田为研究区，分别采集了拔节期和吐丝期的土壤样本及同时期无人机高光谱影像作为数据源，分析作物覆盖条件下土壤光谱反射率与有机质含量的相关关系，并根据其响应波段构建光谱指数，结果发现在拔节期构建的XGBoost预测模型的效果最好。高光谱也被用于土壤信息的制图，Song等[56]基于将高光谱采集到的实验室数据和野外数据进行对比和校正，利用机器学习进行建模和处理，实现了土壤质地高分辨率空间信息的快速准确获取并得到了较好的制图效果。农田土壤水盐信息的精准检测对保护耕地和提高土壤生产力具有重要意义，Chen等[57]使用高光谱反射率结合竞争性自适应重加权采样、BPNN等方法预测土壤含水量，探究了土壤含水率最佳反演模型。此外，更有研究者探索了多维度光谱指数对土壤信息获取的影响，李振[58]研究发现，在使用无人机高光谱反演土壤含盐量时，二维度光谱指数使光谱与土壤含盐量之间的相关性明显提高，预测精度和稳定性都得到了一定的提升。针对高光谱数据存在信息冗余和利用率低等问题，王瑾杰等[59]提出了使用分数阶微分技术逐像元处理机载

高光谱数据的新方法，实现了高光谱数据的深度挖掘和充分利用。

高光谱具有分辨率高、特征提取能力强、多目标精准检测等优势，为智慧农业的发展提供了支撑。但是，在利用高光谱进行土壤理化参数分析的过程中也存在一些挑战，首先是高光谱传感器获取的数据量大且复杂，需要进行大量的数据处理和分析工作，使得图谱特征的选择、提取、存储和利用仍面临着巨大挑战；其次是高光谱传感器对光照条件和大气干扰较为敏感[60]，在实际应用中还需考虑多种环境因素对数据采集的影响；最后是高光谱传感器的价格比较昂贵，不易于被普及使用。未来的研究趋势包括：寻找更适宜的敏感光谱变量筛选方法，有效捕捉土壤理化参数信息与光谱之间的关联性，获取更加详尽和全面的土壤信息；构建更多相关植被指数，提高高光谱反演被覆盖土壤信息的能力；结合多种建模方法，使用更多的模型评价指标，提升模型的整体预测与泛化能力。

2.5 热红外成像

近年来，热红外成像技术取得了突飞猛进的进展，并在土壤含水率监测方面有一些突破成果。Cheng等[61]首先对土壤表面含水量与特定土壤类型界面温差之间的关系进行标定，然后根据红外热像仪测量的土壤表面温度来测量土壤表面含水量。Xu等[62]利用实验室热红外光谱结合PLSR模型估算各种土壤水分条件下的土壤盐分，相关系数R^2可以达到0.71。以上研究都是基于室内分析，而随着无人机遥感技术的不断发展，目前的研究更多集中在基于无人机或卫星平台的多源数据融合上。吴卫熊等[63]基于无人机获取的热红外和多光谱数据，构建了甘蔗的温度植被干旱指数模型，该模型对蔗田成熟期土壤含水率的预测达到了较高精度，相关系数R^2为0.92。此外，热红外技术在土壤重金属污染范围的确定[64]、钾含量的监测[65]等方面也有应用。

热红外成像技术不依赖于光照条件，甚至能够在烟雾或尘土等能见度低的情况下完成土壤理化参数信息的获取。无人机热红外成像可以覆盖较大的区域，一次性获取多个点的信息，提高了工作效率。但热红外传感器的价格昂贵，光谱信息有限并且容易受到环境因素如温度、湿度的影响，同时也需要精细的算法。在未来，开发成本低的设备、融合多种传感器技术来实现更精细的信息感知是其主要研究方向。

3 卫星遥感技术

基于卫星遥感获取土壤理化参数信息是指利用搭载传感器的人造卫星远距离获取土层表面大范围的目标影像数据，提取数据特征进而分析土壤理化参数信息，其效率是实验室检验和近地感知等技术所无法比拟的。常见的卫星遥感影像数据有MODIS、Landsat、Sentinel和高分系列（GF）数据，其主要应用和特点如表4所示。此外，根据卫星遥感式技术获取土壤理化参数信息的过程不同，将其分为直接反演法、间接反演法和结合分析法[66]。

表4 土壤检测中常见的遥感影像数据

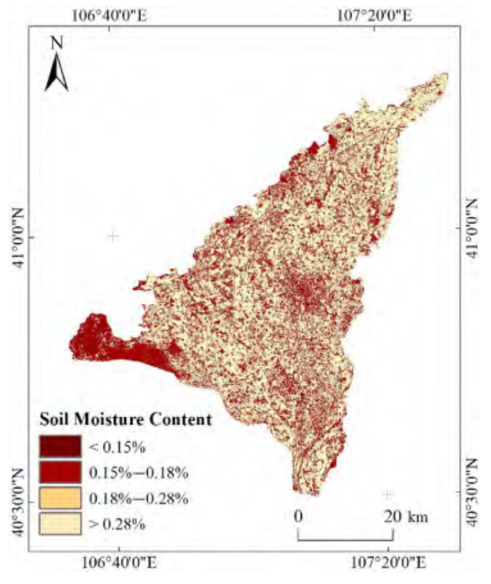
Table 4 Common remote sensing image data in soil detection

遥感影像数据	主要应用	特点
MODIS	土壤有机质、含水量	全球免费、光谱范围广、更新频率高、适用于短期变化的监测和分析
Landsat	土壤有机质、水盐、pH	多光谱波段、高空间分辨率、长时间序列观测
Sentinel	土壤有机质、水盐	免费开放、多源数据、高时空分辨率
高分系列	土壤含水率、有机质、pH	高分辨率、大幅宽覆盖、灵活性高

3.1 直接反演法

直接反演法是利用搭载传感器的人造卫星获取的特征与实测的土壤理化参数信息之间的关系进行理化参数的反演。为提高传统线性回归和机器学习算法在卫星遥感监测土壤含水量中的精度和适用性，Luo等[67]将稳健回归理论引入到算法中，依据GF-1卫星遥感图像和实测土壤含水量构建了不同深度的土壤含水量反演模型，并绘制了土壤水分含量反演图（如图5），实验发现，改进后的回归算法不仅降低了异常值，还提高了模型的精度和适用性。为比较Landsat-8 OLI、Landsat-7 ETM+、Sentinel-2 MSI和MODIS影像的土壤有机质制图性能，Zhang等[68]基于四种影像和实测土壤有机质含量数据建立RF预测模型，并从时间、空间和光谱差异三个方面对制图效果进行探讨，结果表明，Landsat-8是目前土壤有机质制图的最佳选择，而Senti-

nel-2影像在未来有机质制图中最具潜力。此外，Hosseini等[69]提出使用地理空间人工智能（Geospatial Artificial Intelligence, GeoAI）与Landsat-8卫星图像融合的方法来预测土壤物理性质，其构建的混合CNN-RF模型对土壤物理特性有较好的预测效果。



注：该图基于自然资源部标准地图服务网站下载的审图号为蒙S(2020)032号标准地图制作,底图无修改。

图5 农田土壤水分含量反演图[67]

Fig. 5 Farmland soil moisture content inversion map

直接反演法的效率高、速度快，但易受到地形、植被等环境因素的影响，不适用于植被覆盖或地形复杂的地区。为提高该方法的反演精度，所选传感器的时间分辨率、空间分辨率和光谱分辨率应与研究规模相适应，所建立的反演模型应具有足够的稳定性与适应性。

3.2 间接反演法

搭载传感器的人造卫星无法直接获取到植被冠层覆盖下的土壤理化参数信息，但不同的土壤理化特性下植被状态存在差异，这些差异可通过遥感指数进行反映[70]。间接反演法即通过卫星获取遥感指数，进而构建土壤理化参数反演模型。常用于土壤理化特性检测的遥感指数有归一化差异植被指数（Normalized Difference Vegetation Index, NDVI）、增强植被指数（Enhanced Vegetation Index, EVI）和土壤调节植被指数（Soil Adjustment Vegetation Index, SAVI）等。Ghorbani等[71]从Landsat-8和Sentinel-2卫星影像中获取了光谱反射率信息，通过计算多种遥感指数实现光谱数据的挖掘，结果表明，使用逐步决策树模型估算土壤表层水分的精度可达到0.80～0.89，证实了卫星遥感是农田土壤管理的有力工具。考虑到不同作物以及作物处于不同生育期等条件，Liang等[72]采用Sentinel-1合成孔径雷达（Synthetic Aperture Radar, SAR）图像的偏振模式检测土壤含水率，结合Sentinel-2影像提取的NDVI和优化后的水云模型（Water Cloud Model, WCM），建立土壤含水率反演模型，该模型的估计值与野外观测值的决定系数R^2为0.65。另外，Cui等[73]的研究结果表明，对作物进行分类和考虑不同时间序列能够增强光谱指数对土壤盐分的响应敏感性，进而提高建模的精度。

间接反演法为植被覆盖区的土壤理化参数信息获取提供了可靠依据，但其易受气象、地形等环境因素的影响，且大多研究只适用于小区域田块。后续应设计和优化数据采集方法来减小环境因素对反演结果的影响，选取合理的数据量来进一步降低光谱响应的差异，同时可以考虑引入纬度因子将其扩展至大尺度范围内的检测。

3.3 结合分析法

基于地面仪器或机载传感器能够获得精细的土壤信息，而卫星遥感影像在获取大面积的地貌形态和大范围区域数据上具有显著优势。因此，将卫星遥感影像数据与地面仪器或机载传感器所测数据结合使用可以提高大尺度遥感数据的反演能力，实现大面积快速、高效、准确的土壤信息获取。为提高卫星遥感监测土壤盐渍化的精度，毛鸿欣等[74]利用地面实测高光谱数据和Sentinel-2B影像构建了银川平原的土壤盐分反演模型，相比于单独使用Sentinel-2B影像建模，R^2提高了0.30，均方根误差（Root Mean Square Error, RMSE）减小了2.08 g/kg。孙媛等[75]、尚天浩等[76]利用实测高光谱和Landsat-8 OLI影像、Sentinel-2B影像光谱分别对宁夏银北地区土壤含盐量、pH和Na^+含量进行估测，并基于高光谱数据模型对影像模型进行校正，结果表明校正后的预测模型精度均有所提高。相比于与地面仪器所获数据的结合分析，目前研究更多的是将卫星遥感与无人机所获数据的结合分析，如Sun等[77]综合了无人机高光谱数据和Landsat-8多光谱图像的优势，实现了长三角地区土壤盐分和有机质含量的快速、准确估算。此外，还有学者建立了融合星-空-地的土壤监测模型。Qi等[78]先将无人机多光谱和地面高光谱图像进行融合，利用融合后的无

人机图像建立PLS反演模型，并将该模型放到卫星上来实现对玉米种植区土壤盐分的估测，其精度达到较好的效果（R^2=0.72），提高了大尺度遥感数据精细反演土壤盐分的能力。

结合分析法在土壤理化参数信息获取方面有较大的应用潜力，不仅实现了土壤理化参数信息获取从地表点到空间面的尺度变化，可以同时观察到地表特征的细节和整体，还提供了大尺度、多方位的可靠信息。但该方法的成本高，数据复杂，需要较高的遥感影像校正水平，并且要求采样时间与成像时间尽可能一致，否则会存在时空数据不匹配的问题。因此，需要依据各传感器的优势与局限来探索更优越的结合方法和更稳定的分析模型，同时要有合理的数据解释与验证。

4 新型快速获取技术

尽管土壤理化参数获取技术经过数年的研究和发展已取得了很大进步，但要实现土壤理化参数信息的实时原位全方位快速获取仍任重而道远。在与其他学科交叉发展的背景下，一些新型快速获取技术应运而生，如生物传感器、环境磁学、太赫兹光谱和伽马能谱，其优势与局限如表5所示。

表5 土壤检测中的新型快速获取技术

Table 5 New rapid acquisition technology in soil detection

新型快速获取技术	主要应用	优势	局限
生物传感器	土壤重金属离子	灵敏度高、专一性强、分析速度快、成本低	寿命短，易受物理、化学环境因素的影响
环境磁学	土壤重金属、污染物	灵敏度高、非接触性、多参数测量	仅限特定环境、易受干扰影响、数据解释复杂
太赫兹光谱	土壤重金属、含水率	检测速度快、灵敏度高、非破坏性	传输距离受限、数据处理复杂、缺乏标准库
伽马能谱	土壤放射性元素、质地、全氮	高能粒子的能量范围广、分辨率高	探测效率相对较低

4.1 生物传感器

生物传感器利用生物体内的生物分子、细胞或组织等生物材料作为识别元件，通过信号转换元件将生物化学信号转化为可测量的电信号，最后通过信号处理元件等进行分析检测（如图6）。根据生物识别元件的不同，将生物传感器分为酶传感器、免疫传感器、核酸传感器和细胞传感器等。一种由核酸适配体和单壁碳纳米管修饰的场效应管已经被研制出来[79]，通过铅离子与核酸适配体的特异性结合形成稳定的复合体，进而引起双链DNA（Deoxyribo Nucleic Acid）解旋，导致管内载流子数量发生变化，以实现对Pb^{2+}浓度的检测。Chen等[80]将DNA酶和发夹DNA环状组装技术相结合，研制了一种用于土壤有效铅超灵敏检测的荧光生物传感器，该传感器具有较高的鲁棒性、准确性和可靠性，能够直接应用于土壤样品中有效铅的检测，无需复杂的提取步骤。此外，有学者将生物传感器与无人机飞行平台相结合，如Lu等[81]提出了一种用于环境检测的便携式全细胞生物传感器系统，将其搭建在无人机上可以实现偏远位置的信息监测。

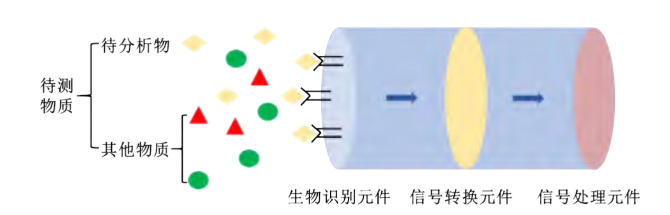


图6 生物传感器原理示意图

Fig.6 Scheme of the principle for an biosensor

4.2 环境磁学

环境磁学是一门交叉于地学、磁学和环境科学的新兴学科，利用地球表层环境中存在的磁性物质（如铁矿物和磁性粒子等）的性质和特征，通过测量和分析其磁性参数进而揭示环境的变化及其过程信息。环境磁学监测仪器可以测量非常微弱的磁场变化，并且采用了高速数字化技术，因此可以在很短的时间内实现高效的数据采集，一般采样时间为毫秒级别。土壤在成壤的过程中会产生强磁性铁氧化物，且土壤磁性与土壤理化参数存在一定的关联。Frankl等[82]探究了SOM与土壤形成的磁铁矿之间的关系，发现提高SOM的含量可以增强土壤磁铁矿的产生和稳定性，为环境磁学在农田土壤分析中的应用提供了技术支撑。为确定农业土壤中含有高浓度的潜在有毒微量元素，Lourenco等[83]利用环境磁学和化学计量学对葡萄牙中部的农业土壤进行分析，结果表明，磁化率能够作为有毒微量元素浓度的最佳检测指标，为农业土壤中有毒微量元素富集的检测提供了简单、快速、无损的有效信息。此外，Franke等[84]和Martin等[85]基于环境磁

学分别探究了侵蚀土壤和重金属污染背景下的土壤磁特性，为土壤的监测与修复提供了新思路。

4.3 太赫兹光谱

太赫兹光谱利用电磁辐射与物质之间的相互作用机制，通过测量和分析太赫兹波段的吸收、透射、反射、散射等光谱特征，来研究物质的结构及其动力学过程。一般来说，太赫兹光谱可以在几分钟到几个小时内完成对土壤的监测，具体时间取决于所选用的仪器性能、样品数量和复杂程度等因素。太赫兹光谱可以很好地用于检测土壤的含水率和重金属，夏佳欣等[86]依据时域太赫兹透射光谱原理，利用土壤含水量的细微变化将会影响透射太赫兹波特性这一特点，成功建立了一种有效测量土壤含水量的方法，结果表明，与当前公认的测量土壤含水量相对精确的称重法相比，该方法的实验测定误差在0.17%～7.01%之间。Li等[87]利用太赫兹光谱和路径分析方法对不同酸碱度下的土壤铅污染进行了观测和识别，探讨了土壤中不同结合态铅对太赫兹吸收光谱影响的检测机理，为开发利用太赫兹技术进行土壤监测提供了理论依据。Lu等[88]使用太赫兹技术研究了土壤中Hg、Cd、Cu的高效无损检测方法，使用概率神经网络（Probabilistic Neural Networks, PNN）和RF模型验证了定性检测的效果，使用BPNN和极限学习机（Extreme Learning Machine, ELM）同时预测了土壤中三种重金属的含量，结果表明，太赫兹对Hg、Cd、Cu污染的土壤具有良好的定性和定量检测能力，尤其是BPNN模型具有很好的预测性能，其对三种重金属土壤的最优决策系数分别为0.95、0.99和0.98，为土壤重金属污染检测提供了技术支持。

4.4 伽马能谱法

伽马能谱法利用土壤样品中放射性元素的衰变过程进行土壤特性分析，其分析时间取决于许多因素，例如所需的检测深度、检测范围、土壤类型以及数据处理与转换等。通常，对于一个标准的土壤样品，其测试时间一般需要几个小时。Heggemann等[89]基于伽马能谱和SVM模型对10个非均质场的土壤质地进行现场独立预测，预测结果的平均R^2分别为0.96（砂土）、0.93（淤泥）和0.78（黏土）。此外，伽马能谱还被用于研究放射性核素浓度与土壤理化参数的关系，Taylor等[90]使用美杜莎MS-700便携式伽马能谱仪测定了农田土壤中40K、238U、232Th和137Cs的活度浓度，并采用线性回归方法分析了活度浓度与农田土壤质地、有机碳和全氮之间的关系。伽马能谱能够提供可靠准确的高分辨率土壤信息，且基于车载[91]和航空[92]的伽马射线光谱数据大大提高了其预测性能，可见其在土壤科学和精准农业中的应用能力不容小觑。

4.5 新型快速获取技术的不足与发展

尽管生物传感器、环境磁学、太赫兹光谱，以及伽马能谱等检测技术具有灵敏度高、速度快等优点，但也存在一些不足之处。比如土壤的成分比较复杂，在设计和制备生物传感器的过程中需要选择合适的生物识别单元，在使用生物传感器的过程中还会受到环境因素如温湿度、酸碱度的影响，导致生物材料的损伤和传感性能的下降；环境磁学的数据解释难度较大，需要结合其他地质学、地球物理学等数据进行综合分析，并且对土壤样品的质量要求较高，样品的保存和处理可能会对测试结果产生影响；太赫兹光谱易受散射光和吸收光的影响，传输距离相对较短，因此在远距离通信方面存在一定的限制；伽马能谱仪器较昂贵，数据处理相对复杂，检测结果也易受到环境因素的影响，需要及时进行校正和修正。因此，后续研究应重点包括：寻找新型生物材料和识别单元，以延长生物传感器的寿命；更深入地探索环境磁学与其他学科交叉发展，如地球化学、气候学等，以获得更全面的地质信息；研发低成本的太赫兹和伽马能谱设备，尝试与其他土壤分析技术相结合，如光谱分析、化学分析等，形成多模态融合的综合分析方法。

5　问题与展望

智慧农业是现代信息技术与传统农业深度融合形成的数字化农业方式，其目的主要为提高劳动生产率、提高土地产出率和提高资源利用率。土壤信息的数据化感知作为智慧农业的重要组成部分，极大地推进了中国农田土壤管理进一步朝着精细化、智能化、集约化和科学化方向发展，成为解决中国人口与土地矛盾的重要途径。目前，农田土壤理化参数获取技术的研究已取得较大进展，但实验室检验技术仍存在设备昂贵、操作过程复杂、检测速度较慢等问题；近地监测传感器的研发成本受到限制，在面对复杂多样的农田环境时，其可靠性、适应性和专业性仍有待提高；遥感反演在数据的获取、处理和应用方面也需要突破现有瓶颈。为进一步提高农田土壤理化参数获取技术的水平，推进智慧农业的发展，可以从以下四个方面展开更深入的

研究。

(1) 开发便携化、智能化和经济型的近地土壤信息获取系统及设备，实现土壤信息的原位快速检测。近地式土壤理化信息获取技术经过数年的发展成为当前应用相对较广泛、精确度相对较高的土壤监测方法，可以根据需要对近地设备及时进行布置和调整，具有较高的灵活性和扩展性。但在实际应用中，仍存在一些问题需要解决，比如近地设备的监测范围有限，土壤传感器的专业性、自适性和检测精度有待提高，大多数仪器设备不便于携带且成本较高。后续应进一步考虑如何选用和设计更优的组成材料、外观体型，在适应复杂农田土壤环境的同时减小体积质量和研发成本；内部搭建能够支持远距离传输和低功耗的无线通信模块，将数据传输到采集设备或云平台，进一步提高数据处理和建模分析的速度，缩短系统延迟时间，以实现土壤信息的实时监测与分析；另外，还可利用地理信息系统、专家系统等建立数据共享和协作平台，将土壤信息感知数据与其他农业数据（如气象数据、作物生长数据等）相结合，以促进农业信息的集成和应用。

(2) 优化低空土壤信息获取平台的性能，完善数据的解译方法。基于无人机飞行平台的低空探测技术弥补了地面感知技术的监测范围有限、信息采集缓慢等缺陷，极其适合中尺度田块的土壤理化参数信息的快速获取。但该技术在土壤监测领域仍处于初级阶段，在性能、算法、成本和决策等方面都有极大的提升空间。首先，为满足多任务监测的要求，需要进一步研发稳定性强、续航时间长以及能够同时搭载多种传感器的飞行平台[93]；其次，应尽可能地降低飞行平台和传感器的研发成本和操作难度[94]，使其应用更加普及；最后，可以通过数字孪生来模拟、分析和优化平台或系统的性能，集成多种优化算法模型来实现数据的深度挖掘，添加自主控制、协同控制等多种支持决策技术来实现数据的综合应用。

(3) 联合多因素构建卫星遥感反演模型，利用多种共享开放的云计算平台实现数据的深度挖掘。当前来看，中国的农业遥感技术进入快速发展阶段，在空间、时间、光谱等维度上的土壤监测能力不断增强。但现有研究大多只建立了土壤参数与遥感数据之间的关系，并未系统地分析气候、地质以及植被等自然因素对该关系的影响，模型的适应性和准确性仍有待提高。另外，卫星遥感数据量大，处理和分析需要专业的技术和设备支持。未来应结合气候学、地质学及生态学等多学科进行反演模型的校正分析，实现由表层土壤到深层土壤的精准监测，探索由观测结果向支持决策的转化过程，逐渐提高分辨率和实时监测能力。同时，在大数据时代的背景下，需要依靠Google Earth Engine、NASA Earth Data等强大的云平台对遥感数据进行剖析，协同人工智能等先进技术推动卫星遥感在土壤监测领域的进步。

(4) 深入探索多源数据融合在土壤理化参数信息获取中的研究与应用，构建泛化能力强、可靠性高的土壤信息感知算法和模型。众多研究表明，同单一来源数据相比，对多源数据进行融合分析不仅可以对数据进行校正，提高数据的准确性，还能将不同数据源的信息进行关联，增强数据的价值，获取更全面、可靠的信息。比如，融合多种光谱或图像数据能够获得互补信息，融合卫星、无人机和地面设备所获数据构建的星-空-地感知模型能够获取多尺度、多角度的综合信息，空间分辨率和时间分辨率也都有所提高。未来可依据不同数据源的权重、特征以及决策结果对土壤感知数据进行融合，消除数据冗余和填补数据空缺，进而提供更全面的视角和更准确的分析结果。另外，深度学习算法已被广泛应用于各类农田土壤信息感知技术，但其对数据的需求量极大，过拟合风险较高，如何构建泛化能力强和可靠性高的算法和模型，特别是利用感知模型开展对土壤感知数据的校准，依旧是未来研究的重点。

利益冲突声明：本研究不存在研究者以及与公开研究成果有关的利益冲突。

参考文献：

[1] 李银霞. 祁连山南坡不同土地利用方式下的土壤理化特征研究[D]. 西宁: 青海师范大学, 2018.
LI Y X. Analysis of soil physicochemical characteristics of land utilization types in the south slope of Qilian Mountains[D]. Xining: Qinghai Normal University, 2018.

[2] 贾国建, 杜振宇, 马丙尧, 等. 山东省长期连作杨树人工林的土壤理化特性与综合肥力评价[J]. 中国土壤与肥料, 2023(4): 8-15.
JIA G J, DU Z Y, MA B Y, et al. Soil physico-chemical characteristics and comprehensive fertility of long-term continuous cropping poplar plantations in Shandong province[J]. Soil and fertilizer sciences in China, 2023(4): 8-15.

[3] 张少彬, 冯钟钟. 重铬酸钾容量法测定广东省部分地区土壤中有机质含量的研究[J]. 广东化工, 2023, 50(4):

189-191, 213.
ZHANG S B, FENG Z Z. Study on determination of organic matter content in soil in some areas of Guangdong province by potassium dichromate volumetric method[J]. Guangdong chemical industry, 2023, 50(4): 189-191, 213.
[4] 赵洁, 王莉. 分光光度法快速测定硝、铵态氮的可行性研究[J]. 现代农业科技, 2011(6): 42, 45.
ZHAO J, WANG L. Feasibility study on NO3--N, NH4+-N determination by spectrophotometry method[J]. Modern agricultural sciences and technology, 2011(6): 42, 45.
[5] 国家标准局. 土壤全氮测定法(半微量开氏法): NY/T 53—1987[S]. 1987.
Administrative Organization National Bureau of Standards. Method for the determination of soil total nitrogen (Semi-micro Kjeldahl method): NY/T 53—1987[S]. 1987.
[6] 赵金兰, 张树莲, 祁建峰. 硫酸-高氯酸-钼锑抗比色法测定土壤全磷的注意事项[J]. 现代农业科技, 2009(21): 234.
ZHAO J L, ZHANG S L, QI J F, et al. Matters needing attention for determination of soil total phosphorus by sulfuric acid-perchloric acid-molybdenum-antimony anti-colorimetric method[J]. Journal of modern agricultural science and technology, 2009(21): 234.
[7] 王芳, 杨静, 李彩虹, 等. 全自动消解仪-火焰光度法测定土壤中全钾实验[J]. 宁夏农林科技, 2017, 58(7): 38-39.
WANG F, YANG J, LI C H, et al. Study on the potassium determination in soil by automatic digestion equipment-flame photometry method[J]. Journal of Ningxia agriculture and forestry science and technology, 2017, 58(7): 38-39.
[8] 王瑞琨. 用电位法测定土壤pH值[J]. 山西化工, 2018, 38(3): 64-65, 76.
WANG R K. Determination of soil pH by potentiometry[J]. Journal of Shanxi chemical industry, 2018, 38(3): 64-65, 76.
[9] XU J W, LIU C, HSU P C, et al. Remediation of heavy metal contaminated soil by asymmetrical alternating current electrochemistry[J]. Nature communications, 2019, 10: ID 2440.
[10] DHAMU V N, SOMENAHALLY A C, PAUL A, et al. Characterization of an *In-situ* soil organic carbon (SOC) via a smart-electrochemical sensing approach[J]. Sensors, 2024, 24(4): ID 1153.
[11] GONG L Y, WANG L, MA Y J, et al. Determination of available iron species in soil by differential pulse voltammetry[J]. Chemistry select, 2023, 8(45): ID e202302824.
[12] YONEBAYASHI K, HATTORI T. Use of the ammonia electrode for analyzing organic nitrogen distribution[J]. Soil science and plant nutrition, 1980, 26(4): 483-489.
[13] ZHAO G, WANG H, LIU G. Sensitive determination of trace Cd(ii) and Pb(ii) in soil by an improved stripping voltammetry method using two different in situ plated bismuth-film electrodes based on a novel electrochemical measurement system[J]. RSC Advances, 2018, 8(10): 5079-5089.
[14] LIU N, ZHAO G, LIU G. Coupling square wave anodic stripping voltammetry with support vector regression to detect the concentration of lead in soil under the interference of copper accurately[J]. Sensors (basel), 2020, 20(23): ID E6792.
[15] ANUBHUTI K, PREITY M, KUMAR C S, et al. Estimation of soil nutrients and fertilizer dosage using ion-selective electrodes for efficient soil management[J]. Communications in soil science and plant analysis, 2024, 55(13): 1920-1941.
[16] BASARYGINA E M, ZYBALOV V S, PAKHOMOVA N A, et al. Information-analytical modeling of soil composition based on spectral analysis[J]. IOP conference series: Earth and environmental science, 2022, 949(1): ID 012129.
[17] ZAYANI H, FOUAD Y, MICHOT D, et al. Detecting the temporal trend of cultivated soil organic carbon content using visible near infrared spectroscopy[J]. Journal of near infrared spectroscopy, 2023, 31(5): 241-255.
[18] BARUAH P, PHUKAN A, SHARMA S, et al. Laser induced breakdown spectroscopy for strength assessment in Ca binded soils[J]. Spectrochimica acta part B: Atomic spectroscopy, 2023, 206: ID 106726.
[19] SCHMIDT K, AUTENRIETH D, NAGISETTY R. A comparison of field portable X-ray fluorescence (FP XRF) and inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS) for analysis of metals in the soil and ambient air[J]. Research square, 2024: PMID 38260675.
[20] ZHANG F L, WEI N, WANG J, et al. Determination of available lead in greenhouse soil by solid phase dispersion extraction coupled with atomic absorption spectrometry based on primary secondary amine[J]. IOP conference series: Earth and environmental science, 2021, 769(2): ID 022056.
[21] BARRA I, HAEFELE S M, SAKRABANI R, et al. Soil spectroscopy with the use of chemometrics, machine learning and pre-processing techniques in soil diagnosis: Recent advances: A review[J]. TrAC trends in analytical chemistry, 2021, 135: ID 116166.
[22] 仇皓雷, 王海燕. 机器学习在土壤性质预测研究中的应用进展[J/OL]. 生态学杂志. (2023-11-20)[2024-02-20]. https://link.cnki.net/urlid/21.1148.Q.20231120.1134.002.
QIU H, WANG H. Application of machine learning to the prediction of soil properties: A review[J/OL]. Chinese journal of ecology. (2023-11-20)[2024-02-20]. https://link.cnki.net/urlid/21.1148.Q.20231120.1134.002.
[23] XU X B, MA F, ZHOU J M, et al. Applying convolutional neural networks (CNN) for end-to-end soil analysis based on laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS) with less spectral preprocessing[J]. Computers and electronics in agriculture, 2022, 199: ID 107171.
[24] SORIANO-DISLA J M, JANIK L J, ALLEN D J, et al. Evaluation of the performance of portable visible-infrared instruments for the prediction of soil properties[J]. Biosystems engineering, 2017, 161: 24-36.
[25] DE LIMA T M, WEINDORF D C, CURI N, et al. Elemental analysis of Cerrado agricultural soils via portable X-ray fluorescence spectrometry: Inferences for soil fertility assessment[J]. Geoderma, 2019, 353: 264-272.
[26] RAWAL A, CHAKRABORTY S, LI B, et al. Determination of base saturation percentage in agricultural soils via portable X-ray fluorescence spectrometer[J]. Geoderma, 2019, 338: 375-382.
[27] VENKADESH V, KAMAT V, BHANSALI S, et al. Advanced multi-functional sensors for *In-situ* soil parameters for sustainable agriculture[J]. The electrochemical society interface, 2023, 32(4): 55-60.

[28] 齐威. 基于电磁感应技术的土壤水分反演与三维可视化研究[D]. 阿拉尔: 塔里木大学, 2021.
QI W. Inversion of soil water content by using apparent electrical conductivity and its 3D visualization[D]. Ala'er: Tarim University, 2021.
[29] RATSHIEDANA P E, ELBASIT M A MABD, ADAM E, et al. Determination of soil electrical conductivity and moisture on different soil layers using electromagnetic techniques in irrigated arid environments in South Africa[J]. Water, 2023, 15(10): ID 1911.
[30] 冯春晖, 刘新路, 纪文君, 等. 基于电磁感应技术的棉田土壤电导率时空异质性研究[J]. 土壤学报, 2022, 59(4): 999-1011.
FENG C H, LIU X L, JI W J, et al. Research on spatiotemporal heterogeneity of soil electrical conductivity in cotton field based on electromagnetic induction technology[J]. Acta pedologica sinica, 2022, 59(4): 999-1011.
[31] SHAUKAT H, FLOWER K C, LEOPOLD M. Comparing quasi-3D soil moisture derived from electromagnetic induction with 1D moisture sensors and correlation to barley yield in variable duplex soil[J]. Soil and tillage research, 2024, 236: ID 105953.
[32] MENSAH C, KATANDA Y, KRISHNAPILLAI M, et al. Estimation of soil water content using electromagnetic induction sensors under different land uses[J]. Environmental research communications, 2023, 5(8): ID 085002.
[33] 韩建文, 罗德芳, 冯春晖, 等. 基于无人机多光谱协同电磁感应技术的棉田土壤盐渍化监测研究[J]. 塔里木大学学报, 2023, 35(3): 52-61.
HAN J W, LUO D F, FENG C H, et al. UAV-based multispectral synergistic electromagnetic sensing technology for salinization of cotton fields[J]. Journal of Tarim university, 2023, 35(3): 52-61.
[34] 宁娟, 丁建丽, 杨爱霞, 等. 基于高光谱与电磁感应技术的干旱区绿洲土壤含水量反演研究[J]. 干旱地区农业研究, 2018, 36(3): 258-265.
NING J, DING J L, YANG A X, et al. Inversion of soil moisture content in the oasis of arid areas using hyperspectral and electromagnetic induction instruments[J]. Agricultural research in the arid areas, 2018, 36(3): 258-265.
[35] 王爽. 基于地面实测热红外光谱和电磁感应技术的土壤盐渍化建模研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2015.
WANG S. Study on modeling of soil salinization based on the measured ground thermal infrared spectra and electromagnetic induction technology[D]. Urumqi: Xinjiang University, 2015.
[36] TIAN H, GAO C, ZHANG X, et al. Smart soil water sensor with soil impedance detected via edge electromagnetic field induction[J]. Micromachines, 2022, 13(9): ID 1427.
[37] RYAZANTSEV P A, HARTEMINK A E, BAKHMET O N. Delineation and description of soil horizons using ground-penetrating radar for soils under boreal forest in Central Karelia (Russia)[J]. Catena, 2022, 214: ID 106285.
[38] 谢国青, 陈紫秋. 探地雷达功率谱特征与土壤含水率相关关系分析[J]. 中国水运, 2022, 22(11): 156-158.
XIE G Q, CHEN Z Q. Correlation analysis between power spectrum characteristics of ground penetrating radar and soil moisture content[J]. China water transport, 2022, 22(11): 156-158.
[39] LIU K X, LU Q, ZENG Z F, et al. Estimation of soil moisture content of farmlands based on AEA method of GPR[J]. Journal of physics: Conference series, 2023, 2651 (1): ID 012036.
[40] SONG W L, LU Y Z, WANG Y, et al. A Pixel-scale measurement method of soil moisture using ground-penetrating radar[J]. Water, 2023, 15(7): ID 1318.
[41] PONGRAC B, GLEICH D, MALAJNER M, et al. Cross-hole GPR for soil moisture estimation using deep learning[J]. Remote sensing, 2023, 15(9): ID 2397.
[42] LI Z L, ZENG Z F, XIONG H Q, et al. Study on rapid inversion of soil water content from ground-penetrating radar data based on deep learning[J]. Remote sensing, 2023, 15(7): ID 1906.
[43] LOMBARDI F, ORTUANI B, FACCHI A, et al. Assessing the perspectives of ground penetrating radar for precision farming[J]. Remote sensing, 2022, 14(23): ID 6066.
[44] 李鑫星, 曹闪闪, 白雪冰, 等. 多光谱技术在土壤成分含量检测中的研究进展[J]. 光谱学与光谱分析, 2020, 40 (7): 2042-2047.
LI X X, CAO S, BAI X B, et al. Research progress of multi-spectral technique in the determination of soil component content[J]. Spectroscopy and spectral analysis, 2020, 40(7): 2042-2047.
[45] HELFER G A, BARBOSA J L V, ALVES D, et al. Multispectral cameras and machine learning integrated into portable devices as clay prediction technology[J]. Journal of sensor and actuator networks, 2021, 10(3): ID 40.
[46] DING J L, YU D L. Monitoring and evaluating spatial variability of soil salinity in dry and wet seasons in the Werigan-Kuqa Oasis, China, using remote sensing and electromagnetic induction instruments[J]. Geoderma, 2014, 235/236: 316-322.
[47] 张同瑞, 赵庚星, 高明秀, 等. 基于近地面多光谱的黄河三角洲典型地区土壤含盐量估算研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2016, 36(1): 248-253.
ZHANG T R, ZHAO G X, GAO M X, et al. Soil salinity estimation based on near-ground multispectral imagery in typical area of the Yellow River Delta[J]. Spectroscopy and spectral analysis, 2016, 36(1): 248-253.
[48] 聂鹏程, 钱程, 覃锐苗, 等. 天空地一体化信息感知与融合技术发展现状与趋势[J]. 智能化农业装备学报(中英文), 2023, 4(2): 1-11.
NIE P C, QIAN C, QIN R M, et al. Development status and trends of space-air-ground integrated information sensing and fusion technology[J]. Journal of intelligent agricultural mechanization, 2023, 4(2): 1-11.
[49] WEI G F, LI Y, ZHANG Z T, et al. Estimation of soil salt content by combining UAV-borne multispectral sensor and machine learning algorithms[J]. Peerj, 2020, 8: ID e9087.
[50] 王银凤. 基于无人机多光谱遥感的土壤含水率反演模型研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2023.
WANG Y F. Research on soil moisture content inversion model based on UAV multi-spectral remote sensing[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2023.
[51] 张成才, 王蕊, 侯佳彤, 等. 基于特征变量筛选的无人机多光谱遥感土壤含水量反演[J/OL]. 中国农村水利水电. (2024-01-15)[2024-02-20]. https://link.cnki.net/urlid/42.1419.TV.20240112.1554.010.
ZHANG C C, WAWNG R, HOU J T, et al. Inversion of soil water content for unmanned aerial vehicle multispectral remote sensing based on feature variable screen-

ing[J/OL]. China rural water and hydropower. (2024-01-15) [2024-02-20]. https://link. cnki. net/urlid/42.1419.TV.20240112.1554.010.

[52] GUO L, SUN X R, FU P, et al. Mapping soil organic carbon stock by hyperspectral and time-series multispectral remote sensing images in low-relief agricultural areas[J]. Geoderma, 2021, 398: ID 115118.

[53] SEO M G, SHIN H S, TSOURDOS A. Soil moisture retrieval model design with multispectral and infrared images from unmanned aerial vehicles using convolutional neural network[J]. Agronomy, 2021, 11(2): ID 398.

[54] CASTALDI F, PALOMBO A, SANTINI F, et al. Evaluation of the potential of the current and forthcoming multispectral and hyperspectral imagers to estimate soil texture and organic carbon[J]. Remote sensing of environment, 2016, 179: 54-65.

[55] 夏晨真, 姜艳艳, 张星宇, 等. 基于无人机高光谱影像的黑土区玉米农田土壤有机质估算[J]. 光谱学与光谱分析, 2023, 43(8): 2617-2626.
XIA C Z, JIANG Y Y, ZHANG X Y, et al. Estimation of soil organic matter in maize field of black soil area based on UAV hyperspectral image[J]. Spectroscopy and spectral analysis, 2023, 43(8): 2617-2626.

[56] SONG Q, GAO X H, SONG Y T, et al. Estimation and mapping of soil texture content based on unmanned aerial vehicle hyperspectral imaging[J]. Scientific reports, 2023, 13: ID 14097.

[57] CHEN S M, LOU F C, TUO Y F, et al. Prediction of soil water content based on hyperspectral reflectance combined with competitive adaptive reweighted sampling and random frog feature extraction and the back-propagation artificial neural network method[J]. Water, 2023, 15(15): ID 2726.

[58] 李振. 基于无人机高光谱的农田土壤盐分估测研究[D]. 济南: 山东师范大学, 2023.
LI Z. Research on the estimation of farmland soil salinity based on UAV hyperspectral data[D]. Jinan: Shandong Normal University, 2023.

[59] 王瑾杰, 丁建丽, 葛翔宇, 等. 分数阶微分技术在机载高光谱数据估算土壤含水量中的应用[J]. 光谱学与光谱分析, 2022, 42(11): 3559-3567.
WANG J J, DING J L, GE X Y, et al. Application of fractional order differential technology in the estimation of soil moisture content using UAV-based hyperspectral data[J]. Spectroscopy and spectral analysis, 2022, 42(11): 3559-3567.

[60] NOURI M, GOMEZ C, GORRETTA N, et al. Clay content mapping from airborne hyperspectral Vis-NIR data by transferring a laboratory regression model[J]. Geoderma, 2017, 298: 54-66.

[61] CHENG Q, TANG C S, LIN Z Z, et al. Measurement of water content at bare soil surface with infrared thermal imaging technology[J]. Journal of hydrology, 2022, 615: ID 128715.

[62] XU L, WANG Z C, HU J S, et al. Estimation of soil salinity under various soil moisture conditions using laboratory based thermal infrared spectra[J]. Journal of the Indian society of remote sensing, 2021, 49(4): 959-969.

[63] 吴卫熊, 金向丹, 李浩翔, 等. 融合无人机多光谱和热红外影像的蔗田土壤含水率监测研究[J]. 节水灌溉, 2024(3): 99-103.
WU W X, JIN X D, LI H X, et al. Research on monitoring soil moisture content in sugarcane fields by integrating drone multispectral and thermal infrared images[J]. Water saving irrigation, 2024(3): 99-103.

[64] 严小坚, 张敏, 严小兵, 等. 基于无人机热红外摄影的土壤重金属污染范围监测方法研究[J]. 环境科学与管理, 2023, 48(11): 131-136.
YAN X J, ZHANG M, YAN X B, et al. Monitoring method of heavy metal pollution range in soil based on UAV thermal infrared photography[J]. Environmental science and management, 2023, 48(11): 131-136.

[65] 李明, 秦凯, 赵宁博, 等. 基于TASI热红外数据的黑土土壤发射率光谱与土壤全钾含量关系研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2020, 40(9): 2862-2868.
LI M, QIN K, ZHAO N B, et al. Study on the relationship between black soil emissivity spectrum and total potassium content based on TASI thermal infrared data[J]. Spectroscopy and spectral analysis, 2020, 40(9): 2862-2868.

[66] 贾鲁净, 杨联安, 冀泳帆, 等. 卫星遥感反演土壤有机质研究进展[J]. 遥感信息, 2023, 38(2): 1-9.
JIA L J, YANG L A, JI Y F, et al. Review on inversion of soil organic matter using satellite remote sensing[J]. Remote sensing information, 2023, 38(2): 1-9.

[67] LUO L Y, LI Y J, GUO F, et al. Research on robust inversion model of soil moisture content based on GF-1 satellite remote sensing[J]. Computers and electronics in agriculture, 2023, 213: ID 108272.

[68] ZHANG W Q, LUO C, MENG X T, et al. Predicting regional soil organic matter content utilizing conventional satellites: Assessing the influence of temporal, spatial, and spectral disparities[J]. Catena, 2024, 237: ID 107821.

[69] HOSSEINI F S, SEO M B, RAZAVI-TERMEH S V, et al. Geospatial artificial intelligence (GeoAI) and satellite imagery fusion for soil physical property predicting[J]. Sustainability, 2023, 15(19): ID 14125.

[70] LOU H Z, REN X Y, YANG S T, et al. Relations between microtopography and soil N and P observed by an unmanned aerial vehicle and satellite remote sensing (GF-2) [J]. Polish journal of environmental studies, 2021, 30 (1): 257-271.

[71] GHORBANI K, ZOLFAGHARY P, SIAHBALAEI M, et al. Estimating soil surface moisture by using Landsat 8 and Sentinel-2 satellites techniques depending on the stepwise decision tree[J]. Earth science informatics, 2024, 17 (2): 1147-1160.

[72] LIANG J W, LIANG G J, ZHAO Y C, et al. A synergic method of Sentinel-1 and Sentinel-2 images for retrieving soil moisture content in agricultural regions[J]. Computers and electronics in agriculture, 2021, 190: ID 106485.

[73] CUI X, HAN W T, ZHANG H H, et al. Estimating and mapping the dynamics of soil salinity under different crop types using Sentinel-2 satellite imagery[J]. Geoderma, 2023, 440: ID 116738.

[74] 毛鸿欣, 贾科利, 张旭. 基于实测高光谱和Sentinel-2B影像的银川平原土壤盐分反演[J]. 云南大学学报(自然科学版), 2021, 43(5): 929-941.
MAO H X, JIA K L, ZHANG X. Inversion of soil salinity in Yinchuan Plain based on measured hyperspectral data and Sentinel-2B images[J]. Journal of Yunnan university (natural sciences edition), 2021, 43(5): 929-941.

[75] 孙媛, 贾萍萍, 尚天浩, 等. 基于地表高光谱与OLI影像

的土壤含盐量和pH值估测[J]. 干旱地区农业研究, 2021, 39(1): 164-174.
SUN Y, JIA P P, SHANG T H, et al. Estimation of soil salinity and pH value based on surfacehyperspectral and OLI images[J]. Agricultural research in the arid areas, 2021, 39(1): 164-174.
[76] 尚天浩, 陈睿华, 张俊华, 等. 基于实测高光谱与Sentinel-2B数据的银北土壤Na^+含量估测[J]. 应用生态学报, 2021, 32(3): 1023-1032.
SHANG T H, CHEN R H, ZHANG J H, et al. Estimation of soil Na^+ content based on measured hyperspectral and Sentinel-2B data in northern Ningxia, China[J]. Chinese journal of applied ecology, 2021, 32(3): 1023-1032.
[77] SUN M Y, LI Q, JIANG X Z, et al. Estimation of soil salt content and organic matter on arable land in the Yellow River Delta by combining UAV hyperspectral and Landsat-8 multispectral imagery[J]. Sensors, 2022, 22(11): ID 3990.
[78] QI G H, CHANG C Y, YANG W, et al. Soil salinity inversion in coastal corn planting areas by the satellite-UAV-ground integration approach[J]. Remote sensing, 2021, 13 (16): ID 3100.
[79] 王辉. 农田土壤和灌溉水中重金属检测关键技术研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2018.
WANG H. Research on the key techniques for heavy metals detection in farmland soil and irrigation water[D]. Beijing: China Agricultural University, 2018.
[80] CHEN J H, CHEN M J, TONG H, et al. Fluorescence biosensor for ultrasensitive detection of the available lead based on target biorecognition-induced DNA cyclic assembly[J]. Science of the total environment, 2023, 905: ID 167253.
[81] LU Y, MACIAS D, DEAN Z S, et al. A UAV-mounted whole cell biosensor system for environmental monitoring applications[J]. IEEE trans nanobioscience, 2015, 14(8): 811-817.
[82] FRANKL A L, MAXBAUER D P, SAVINA M E. Linkages between soil organic matter and magnetic mineral formation in agricultural fields in southeastern Minnesota, USA[J]. Geoderma, 2022, 406: ID 115466.
[83] LOURENÇO A M, GOMES C R. Integration of magnetic measurements, chemical and statistical analysis in characterizing agricultural soils (central Portugal) [J]. Environmental earth sciences, 2016, 75(11): ID 968.
[84] FRANKE C, PATAULT E, ALARY C, et al. Magnetic fingerprinting of fluvial suspended particles in the context of soil erosion: Example of the canche river watershed (northern France) [J]. Geochemistry, geophysics, geosystems, 2020, 21(5): ID e2019GC008836.
[85] MARTIN A P, OHNEISER C, TURNBULL R E, et al. Soil magnetic susceptibility mapping as a pollution and provenance tool: An example from southern New Zealand[J]. Geophysical journal international, 2018, 212(2): 1225-1236.
[86] 夏佳欣, 范成发, 王可嘉, 等. 基于太赫兹透射谱的土壤含水量测量[J]. 激光与光电子学进展, 2011, 48(2): ID 023001.
XIA J X, FAN C F, WANG K J, et al. Soil moisture measurement based on terahertz transmission spectrum[J]. Laser & optoelectronics progress, 2011, 48(2): ID 023001.
[87] LI B, LI C, DONG C, et al. Mechanism of lead pollution detection in soil using terahertz spectrum[J]. International journal of environmental science and technology, 2022, 19 (8): 7243-7250.
[88] LU W, LUO H, HE L X, et al. Detection of heavy metals in vegetable soil based on THz spectroscopy[J]. Computers and electronics in agriculture, 2022, 197: ID 106923.
[89] HEGGEMANN T, WELP G, AMELUNG W, et al. Proximal gamma-ray spectrometry for site-independent in situ prediction of soil texture on ten heterogeneous fields in Germany using support vector machines[J]. Soil and tillage research, 2017, 168: 99-109.
[90] TAYLOR A, KALNINS A, KOOT M, et al. Portable gamma spectrometry for rapid assessment of soil texture, organic carbon and total nitrogen in agricultural soils[J]. Journal of soils and sediments, 2023, 23(6): 2556-2563.
[91] 王鹏, 朱琨日, 窦玉春, 等. 基于车载伽马能谱仪的土壤放射性元素识别研究[J]. 机械工业标准化与质量, 2023 (7): 17-21.
WANG P, ZHU K R, DOU Y C, et al. Study on identification of soil radioactive elements based on vehicle gamma spectrometer[J]. Machinery industry standardization & quality, 2023(7): 17-21.
[92] LOISEAU T, RICHER-DE-FORGES A C, MARTELET G, et al. Could airborne gamma-spectrometric data replace lithological maps as co-variates for digital soil mapping of topsoil particle-size distribution? A case study in Western France[J]. Geoderma regional, 2020, 22: ID e00295.
[93] 陈学庚, 温浩军, 张伟荣, 等. 农业机械与信息技术融合发展现状与方向[J]. 智慧农业(中英文), 2020, 2(4): 1-16.
CHEN X G, WEN H J, ZHANG W R, et al. Advances and progress of agricultural machinery and sensing technology fusion[J]. Smart agriculture, 2020, 2(4): 1-16.
[94] YAO H, QIN R J, CHEN X Y. Unmanned aerial vehicle for remote sensing applications: A review[J]. Remote sensing, 2019, 11(12): ID 1443.

Research Advances and Prospects on Rapid Acquisition Technology of Farmland Soil Physical and Chemical Parameters

QI Jiangtao[1,2], CHENG Panting[1,2], GAO Fangfang[1,2], GUO Li[1,2], ZHANG Ruirui[3*]

(1. *Key Laboratory of Bionic Engineering, Ministry of Education, Jilin University, Changchun* 130022, *China*; 2. *College of Biological and Agricultural Engineering, Jilin University, Changchun* 130022, *China*; 3. *Research Center of Intelligent Equipment, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Beijing* 100097, *China*)

Abstract:

[Significance] Soil stands as the fundamental pillar of agricultural production, with its quality being intrinsically linked to the efficiency and sustainability of farming practices. Historically, the intensive cultivation and soil erosion have led to a marked deterioration in some arable lands, characterized by a sharp decrease in soil organic matter, diminished fertility, and a decline in soil's structural integrity and ecological functions. In the strategic framework of safeguarding national food security and advancing the frontiers of smart and precision agriculture, the march towards agricultural modernization continues apace, intensifying the imperative for meticulous soil quality management. Consequently, there is an urgent need for the rrapid acquisition of soil's physical and chemical parameters. Interdisciplinary scholars have delved into soil monitoring research, achieving notable advancements that promise to revolutionize the way we understand and manage soil resource.

[Progress] Utilizing the the Web of Science platform, a comprehensive literature search was conducted on the topic of "soil," further refined with supplementary keywords such as "electrochemistry", "spectroscopy", "electromagnetic", "ground-penetrating radar", and "satellite". The resulting literature was screened, synthesized, and imported into the CiteSpace visualization tool. A keyword emergence map was yielded, which delineates the trajectory of research in soil physical and chemical parameter detection technology. Analysis of the keyword emergence map reveals a paradigm shift in the acquisition of soil physical and chemical parameters, transitioning from conventional indoor chemical and spectrometry analyses to outdoor, real-time detection methods. Notably, soil sensors integrated into drones and satellites have garnered considerable interest. Additionally, emerging monitoring technologies, including biosensing and terahertz spectroscopy, have made their mark in recent years. Drawing from this analysis, the prevailing technologies for soil physical and chemical parameter information acquisition in agricultural fields have been categorized and summarized. These include: 1. Rapid Laboratory Testing Techniques: Primarily hinged on electrochemical and spectrometry analysis, these methods offer the dual benefits of time and resource efficiency alongside high precision; 2. Rapid Near-Ground Sensing Techniques: Leveraging electromagnetic induction, ground-penetrating radar, and various spectral sensors (multispectral, hyperspectral, and thermal infrared), these techniques are characterized by their high detection accuracy and swift operation. 3. Satellite Remote Sensing Techniques: Employing direct inversion, indirect inversion, and combined analysis methods, these approaches are prized for their efficiency and extensive coverage. 4. Innovative Rapid Acquisition Technologies: Stemming from interdisciplinary research, these include biosensing, environmental magnetism, terahertz spectroscopy, and gamma spectroscopy, each offering novel avenues for soil parameter detection. An in-depth examination and synthesis of the principles, applications, merits, and limitations of each technology have been provided. Moreover, a forward-looking perspective on the future trajectory of soil physical and chemical parameter acquisition technology has been offered, taking into account current research trends and hotspots.

[Conclusions and Prospects] Current advancements in the technology for rapaid acquiring soil physical and chemical parameters in agricultural fields have been commendable, yet certain challenges persist. The development of near-ground monitoring sensors is constrained by cost, and their reliability, adaptability, and specialization require enhancement to effectively contend with the intricate and varied conditions of farmland environments. Additionally, remote sensing inversion techniques are confronted with existing limitations in data acquisition, processing, and application. To further develop the soil physical and chemical parameter acquisition technology and foster the evolution of smart agriculture, future research could beneficially delve into the following four areas: Designing portable, intelligent, and cost-effective near-ground soil information acquisition systems and equipment to facilitate rapid on-site soil information detection; Enhancing the performance of low-altitude soil information acquisition platforms and refine the methods for data interpretation to ensure more accurate insights; Integrating multifactorial considerations to construct robust satellite remote sensing inversion models, leveraging diverse and open cloud computing platforms for in-depth data analysis and mining; Engaging in thorough research on the fusion of multi-source data in the acquisition of soil physical and chemical parameter information, developing soil information sensing algorithms and models with strong generalizability and high reliability to achieve rapaid, precise, and intelligent acquisition of soil parameters.

Key words: physical and chemical parameters of soil; spectral analysis; electromagnetic induction; ground penetrating radar; satellite remote sensing; fast sensing

Foundation items: National Key Research and Development Program of Ministry of Science and Technology (2021YFD2000201);The Research Foundation of Science and Technology Department of Jilin Province (20230508032RC)

Biography: QI Jiangtao, E-mail: qijiangtao@jlu.edu.cn

***Corresponding author:** ZHANG Ruirui, E-mail: zhangrr@nercita.org.cn